

天体回転円盤における磁気乱流・ダイナモ・状態遷移の大局的 3次元数値実験

Global 3D simulations of magnetohydrodynamic turbulence, dynamo, and state transitions in astrophysical rotating disks

松元 亮治[1]

Ryoji Matsumoto[1]

[1] 千葉大・理・物理

[1] Dept. Physics, Fac. Sci., Chiba Univ.

<http://www.astro.phys.s.chiba-u.ac.jp/~matumoto>

重力を及ぼす天体のまわりを回転するガス円盤の研究が最近、大きく進展している。我々は回転プラズマのグローバルシミュレーションを行うための3次元磁気流体コードを開発し、これを適用することによって、天体回転円盤における磁気乱流生成、磁場増幅、状態遷移などの研究を進めている。その結果を中心に報告する。

ハッブル宇宙望遠鏡は、誕生しつつある星のまわりにトーラス状の回転円盤が存在し、中心にある原始星近傍から回転軸方向に細く絞られた高速プラズマ流(ジェット)を噴出していることを明らかにした。活動銀河中心でも、重力中心のまわりを回転する円盤とジェットが観測されている。これらの、回転しながら重力中心に向かってゆっくりと落下する物質によって形成される円盤(降着円盤)は、回転物質の持つ重力エネルギーを磁場や輻射のエネルギーとして取り出すことにより、激しく時間変動するX線放射、ジェット噴出など、様々な活動現象のエネルギー源になっていると考えられている。

降着円盤では、遠心力、圧力勾配力と中心天体の重力がほぼ釣り合った状態にある。この円盤物質が落下するためには、角運動量を輸送することが必要になる。従来の降着円盤理論では、この輸送係数をパラメータとしてモデルが構築されていた。しかしながら、観測結果を説明するためにはきわめて高い輸送効率が必要であり、その起源は謎だった。降着円盤は内側ほど角速度が大きい差動回転をしているため、ケルビンヘルムホルツ的な不安定性が成長して乱流状態となる可能性がある。しかしながら、J.Hawleyら(1991)による3次元シミュレーションの結果、この機構で十分な角運動量輸送効率を得ることはできないことが明らかになった。

残る可能性は磁場による乱流の励起である。Balbus and Hawley (1991)は差動回転しているプラズマ円盤を貫く弱い磁場がある場合、回転のタイムスケールで成長する磁気不安定性(磁気回転不安定性)が存在することを指摘した。この不安定性はマクスウェルストレスによる角運動量輸送に起源を持つ。

我々は、回転プラズマのグローバルシミュレーションを行うための3次元磁気流体コード(ARPS: Astrophysical Rotating Plasma Simulator)を開発し、降着円盤全体を計算領域に含めた3次元シミュレーションを実施した。初期状態は角運動量一定の回転トーラスを方位角方向の弱い磁場が貫いている状態とした。シミュレーションの結果、磁気回転不安定性が成長してトーラス内が乱流状態になり、乱れた磁場のマクスウェルストレスにより角運動量が効率的に輸送されてトーラス物質が中心天体に向けて落下し、降着円盤を形成することが示された。準定常状態でのプラズマ値は、やはり10程度、角運動量輸送率はモデルと観測を比較することによって推定されていた値と一致した(Matsumoto 1999, Machida et al. 2000)。降着円盤の角運動量輸送問題は解決され、現象論的パラメータを導入することなく、降着円盤の時間発展を調べることが可能になった。

Machida and Matsumoto (2003)は、ARPSをブラックホールまわりの降着円盤に適用し、ブラックホール近傍で1000回転のタイムスケールのグローバルシミュレーションを実施した。その結果、ブラックホールに落下する円盤物質により磁場が引き延ばされて円盤内部に電流層を形成すること、この電流層に蓄積された磁気エネルギーが磁気リコネクションによって爆発的に解放され、X線フレアが発生することが示された。この機構により、ブラックホール候補天体白鳥座X-1で観測されているX線強度の突発的な増光現象(X線ショット)を説明することができる。また、より小規模な円盤中での乱流磁気リコネクションにより、観測されている1/fノイズ的時間変動を再現することにも成功した。

現在、我々はブラックホール候補天体で観測されているX線スペクトルが硬い(硬X線強度が強い)ハードステートから、軟らかい(軟X線強度が強い)ソフトステートへの状態遷移を再現する3次元磁気流体シミュレーションを実施中である。ブラックホールのロゼッタストーンとも呼ばれる天体GRS1915+105では、この遷移が頻繁に観測されている。遷移の原因は降着率変動と円盤の熱不安定性にある。衝撃波とジュール熱による円盤加熱と輻射冷却を含めた状態遷移のシミュレーション結果を報告する。